

明 細 書

疲労亀裂の進展抑制方法及び検出方法、並びに、それらに用いるペー
スト

技術分野

[0001] 本発明は、金属等の表面に発生する疲労亀裂の進展を抑制する方法、及び、疲労亀裂を検出する方法に関する。さらに、本発明は、それらの方法に用いられるペーストに関する。

背景技術

[0002] 従来より、静的な破壊応力よりはるかに小さな応力であっても、その応力を金属に繰返し加えることによって微小亀裂(疲労亀裂)が発生する金属の疲労現象が知られている。この疲労亀裂が発生した部分に、さらに、応力を繰返し加えることによって、疲労亀裂は拡大し、ひいては金属の切断に繋がる。一方、現在の社会において、金属はいたるところに使われている。そのため、疲労亀裂の進展の抑制、及び、疲労亀裂の早期検出は、大変重要な課題となっている。

[0003] 図8は、疲労亀裂の発生及び進展を説明するための図である。図8の(A)に示すように、繰返し応力による疲労損傷の蓄積によって、金属表面に微小亀裂が発生する。また、図8の(B)に示すように、引張り荷重が加えられることにより亀裂が開口し、図8の(C)に示すように、引張り荷重の除去により亀裂が閉口する。さらに、図8の(D)に示すように、再び引張り荷重が加えられることにより亀裂が開口する。このように、亀裂の開閉を繰り返すことにより亀裂が進展する。ここで、図8の(A)及び(C)に示すように、引張り荷重が加えられていない場合には、亀裂が閉口しているため、目視による亀裂の検出が困難であるという問題がある。

[0004] 関連する技術として、日本国特許出願公開公報JP-A-8-29410の第1〜3頁及び図1には、外観は黒色不透明で表面は粗面で様々な形状をした立体物を対象に、部位も方向もランダムに発生するクラックを、量産ラインで使用可能な、高速、高感度、非破壊で検出する亀裂検出方法が開示されている。

[0005] この亀裂検出方法によれば、亀裂にアセトンやベンゼン等の揮発性溶媒を浸透さ

せ、表面を乾燥させた試料を密封容器の中に静置して、試料の表面を沿って流れるヘリウムや窒素等のキャリアガスに、気化することにより混入した揮発性溶媒の濃度を検出することにより、亀裂が存在することを簡単に検出することができる。

[0006] しかしながら、この亀裂検出方法においては、亀裂が存在することを検出した場合でも、試料の亀裂が存在する場所までは検出することができない。また、密封容器が必要であるので、船や飛行機等の大型な試料については検出が困難である。したがって、試料の亀裂が存在する場所を検出するためには、従来と同様に、超音波探傷法、渦電流探傷法、磁気探傷法、染色探傷法等の技術を用いる必要がある。

[0007] また、日本国特許出願公開公報JP-A-56-12552の第1〜2頁及び第1図には、染色探傷法のように経験者を必要とせず、未経験者でも傷の有無を容易に判別できる上、染色探傷法のように、染色浸透剤、現像剤の塗布、拭取りを必要とせず、液体の塗布、検査後は液体の自然蒸発を待てばよい亀裂検出方法が開示されている。

[0008] この亀裂検出方法によれば、亀裂に水やエチルアルコール等の液体を浸透させ、表面を乾燥させた物体の表面を、温度センサやアルコールセンサを用いて走査し、亀裂内部に残っている液体の蒸気の濃度を検出することにより、亀裂の存在を検出することができる。

[0009] しかしながら、センサが感知するのは、センサに極めて近い範囲の蒸気であるので、この亀裂検出方法においては、物体表面に沿って物体全体を走査する必要がある、船や飛行機等の大型な物体に対しては、多くの走査時間がかかる。

発明の開示

[0010] そこで、上記の点に鑑み、本発明は、比較的初期の段階においても目視により容易に疲労亀裂を検出することが可能な疲労亀裂の検出方法を提供することを目的とする。さらに、本発明は、疲労亀裂の進展を抑制することができる疲労亀裂の進展抑制方法、及び、それらの方法に用いられるペーストを提供することを目的とする。

[0011] 以上の課題を解決するため、本発明に係る疲労亀裂の進展抑制方法は、母材の硬度以上の硬度を有する粒子と粘性を有する油とが混合されたペーストを準備するステップ(a)と、母材の所望の個所にペーストを塗布するステップ(b)とを具備する。

[0012] また、本発明に係る疲労亀裂の検出方法は、母材の硬度以上の硬度を有する粒子

と粘性を有する油とが混合されたペーストを準備するステップ(a)と、母材の所望の個所にペーストを塗布するステップ(b)と、母材において疲労亀裂が開閉することによって粒子によって母材が研削されて生じた母材粉が、ペーストの表面に移動して生じた色彩の変化に基づいて、疲労亀裂を検出するステップ(c)とを具備する。

[0013] さらに、本発明に係るペーストは、母材の疲労亀裂の進展を抑制し、又は、母材の疲労亀裂を検出するために、母材の所望の個所に塗布されるペーストであって、粒径が $2\mu\text{m}$ ～ $40\mu\text{m}$ の粒子と、粘度が $5000\sim 15000\text{cP}$ (センチポワズ)の油とを混合して得られる。

[0014] 本発明によれば、比較的初期の段階においても目視により容易に疲労亀裂を検出することが可能な疲労亀裂の検出方法を提供することができる。さらに、疲労亀裂の進展を抑制することができる疲労亀裂の進展抑制方法、及び、それらの方法に用いられるペーストを提供することができる。

発明を実施するための最良の形態

[0015] 以下、本発明を実施するための最良の形態について、図面を参照しながら詳しく説明する。

まず、本発明の一実施形態に係る疲労亀裂の進展抑制方法について説明する。図1は、本発明の一実施形態に係る疲労亀裂の進展抑制方法を説明するための図である。

[0016] まず、金属又はセラミックス等の微細粒を、適度の粘性を有する油に混合して、ペースト状の微細粒ペーストを作成しておく。図1の(A)に示すように、金属や強化プラスチック等の母材1において、疲労亀裂の発生及び拡大が予め予想される個所の表面に、この微細粒ペースト2を塗布する。

[0017] ここで、微細粒としては、母材の硬度と同等、又は、それよりも大きい硬度を有する材料を使用することが望ましい。例えば、母材が200程度のビッカース硬度を有する金属である場合には、微細粒として、ビッカース硬度が200以上の材料を使用する。微細粒の粒径は、ふるいを用いて、 $2\mu\text{m}$ ～ $40\mu\text{m}$ (平均 $15\mu\text{m}$)程度に揃えることが望ましい。

[0018] また、微細粒を混合する油としては、 $5000\sim 15000\text{cP}$ (センチポワズ)程度の粘度

を有する油を使用する。なお、 $1000\text{cP}=10\text{P}=1\text{Pa}\cdot\text{s}$ (パスカル秒) である。特に、例えばシリコングリース等の様に、温度変化による粘度の変化が小さい油を使用することが望ましい。

[0019] 図1の(A)に示すように、繰返し応力による疲労損傷の蓄積によって、金属表面に微小亀裂が発生する。さらに、図1の(B)に示すように、引張り荷重が加えられることにより亀裂が開口し、亀裂が進展する。微細粒ペースト2は、亀裂の開閉に伴うポンプ作用や亀裂先端の毛細管現象によって、開口した亀裂の内部に入り込む。

[0020] ここで、図1の(C)に示すように、引張り荷重を除去した場合においても、微細粒ペースト2は亀裂の内部にくさびとして残留し、亀裂の閉口を妨げる。したがって、図1の(D)に示すように、再び引張り荷重が加えられた場合においても、亀裂面の変位が抑制されるために、亀裂の開閉による亀裂の進展速度を低下させて疲労寿命を延ばすことができる。

[0021] 次に、微細粒ペーストによる亀裂進展抑制効果について、疲労試験の結果に基づいて説明する。図2は、この疲労試験において、微細粒ペーストを塗布する母材として用いる試験片の形状を示す図である。母材としては、板厚5mmのアルミニウム-マグネシウム合金A5083P-O材(日本軽金属製)の試験片を使用した。図2に示すように、試験片の中央部に、直径2mmの穴を形成し、その穴を通過するように、長さ10mmで幅0.3mmの人工切欠きを放電加工により形成した。

[0022] 疲労試験は、動的容量98kNの電気-油圧サーボ式疲労試験機を用いて、荷重比 $R=0$ の完全片振り荷重制御で行った。荷重波形は正弦波とし、制御信号の発生及び荷重データのサンプリングには32ビットCPUのパーソナルコンピュータを用い、サンプリング周波数は200Hzとした。

[0023] 微細粒としては、磁粉探傷用の鉄の磁粉(乾式灰色、太陽物産製)、及び、粒度分布の異なる2種類のアルミナ粒子(パウレックス製)を用いた。これらの微細粒を油に混合し、液垂れしない程度のペースト状にして、試験片の切欠き部及び予想される亀裂進展経路に塗布した。

[0024] 図3は、疲労試験の結果において、切欠きの無い部分における公称応力レンジ $\Delta\sigma_n$ と破断寿命 N_f との関係を示す図である。ここで、●印は、何も塗布しない場合の

試験結果であり、◎印は、油のみを塗布した場合の試験結果である。○印は、磁粉探傷用の磁粉(Fe)を用いた磁粉ペーストを塗布した場合の試験結果である。

- [0025] また、△印は、平均粒径 $47.3\mu\text{m}$ のアルミナ粒子(Al_2O_3)を用いたアルミナペーストを塗布した場合の試験結果であり、▽印は、平均粒径 $15.2\mu\text{m}$ のアルミナ粒子(Al_2O_3)を用いたアルミナペーストを塗布した場合の試験結果である。
- [0026] 図3に示すように、油のみを塗布した場合の破断寿命は、何も塗布しない場合の破断寿命と同程度である。それに対し、磁粉ペーストを塗布した場合の破断寿命は、何も塗布しない場合の破断寿命に比べて、18万〜25万回程度延びている。したがって、油自体によるくさび効果は無視できる程度であり、磁粉によるくさび効果により破断寿命が延びると考えられる。
- [0027] また、平均粒径 $47.3\mu\text{m}$ のアルミナ粒子を用いたアルミナペーストを塗布した場合の破断寿命は、何も塗布しない場合の破断寿命と同程度である。その理由は、粒径が大きいと、油との懸濁性が悪く、亀裂の先端部分にアルミナ粒子が供給されないことによるものと考えられる。
- [0028] それに対し、平均粒径 $15.2\mu\text{m}$ のアルミナ粒子を用いたアルミナペーストを塗布した場合の破断寿命は、何も塗布しない場合の破断寿命に比べて、40万〜70万回程度延びている。この場合に、今回試験した中では最も顕著な亀裂進展抑制効果が得られた。
- [0029] 次に、本発明の一実施形態に係る疲労亀裂の検出方法について説明する。図4は、本発明の一実施形態に係る疲労亀裂の検出方法を説明するための図である。本実施形態に係る疲労亀裂の検出方法は、上記において説明した疲労亀裂の進展抑制方法と重複して実施することが可能である。
- [0030] 本実施形態に係る疲労亀裂の検出方法においては、アルミナやジルコニア等のセラミックスのような淡色の微細粒を油に混合することにより、淡色のペースト状の微細粒ペーストを作成する。微細粒に関するその他の条件や、油に関する条件は、上記において説明した疲労亀裂の進展抑制方法におけるのと同様である。本実施形態においては、母材として鉄鋼を用い、微細粒として白色のセラミックスを用いる。この場合には、微細粒の硬度は、母材の硬度よりも大きくなる。

- [0031] 図1を参照しながら説明したように、亀裂の内部に残留した微細粒ペースト2がくさびを形成するために、亀裂の開閉による亀裂の進展を抑制することができる。この亀裂の開閉においては、図4の(A)に示すように、引張り荷重を除去すると、亀裂面が閉じようとするため、微細粒のくさびと亀裂面との間に大きな反発力が発生する。したがって、母材よりも相対的に大きい硬度を有する微細粒は、亀裂面を強く圧迫すると共に、亀裂面の一部を研削して亀裂面の母材を粉状化する。また、微細粒も、亀裂面の反発力により砕けて、更に細粒化する。
- [0032] さらに、図4の(B)に示すように、母材粉は、亀裂の開閉に伴うポンプ作用により、微細粒ペースト2の油及び細粒化した微細粒と混然となって、微細粒ペースト2の表面に滲み出る。一般に、金属の粉末は黒色を呈するため、母材粉が混然となった微細粒ペースト3は、黒色を呈する。ここで、母材粉が混然となっていない微細粒ペースト2は白色であるため、白色と黒色のコントラストにより色彩の変化が生じ、亀裂の位置及び長さ等が容易に視認できる。
- [0033] 次に、本実施形態に係る疲労亀裂の検出方法の試験結果について説明する。図5は、図2に示す形状を有する高張力鋼SM490Aにおける疲労亀裂の検出状態及び進展状況を示す図である。ここで、図5の(A)は、57万6千回の延伸を繰り返した後の状態を示す図であり、図5の(B)は、67万2千回の延伸を繰り返した後の状態を示す図である。なお、図中の上下方向が延伸方向である。
- [0034] 図5の(A)に示すように、白色の微細粒ペースト上において、亀裂部分を示す黒色が発色するので、亀裂の位置及び長さ等が容易に視認できる。また、図5の(A)における黒色部に比べて、図5の(B)における黒色部が延びているように、亀裂の進展状況を容易に視認できる。
- [0035] 図6は、疲労亀裂の検出方法の別の試験に用いる試験片の形状を示す図である。ここで、図6の(A)は、試験片の平面図であり、図6の(B)は、試験片の側面図である。図6に示すように、この試験片は、1枚の主板に2枚のリブ板を溶接により接合した溶接継手試験片であり、材質はTMCP(熱加工制御プロセス)鋼K32Aである。
- [0036] 図7は、図6に示す溶接継手試験片における亀裂の検出状態を示す図である。ここで、図7の(A)は、微細粒ペーストを塗布する前の状態を示す図であり、図7の(B)は

、図中の上下方向に120万回の延伸を繰り返した後の状態を示す図である。

[0037] 図7の(A)に示すような溶接部は、疲労亀裂が発生することが容易に想像できる。そこで、疲労亀裂の発生が予想される溶接部に、予め微細粒ペーストを塗布しておく。すると、図7の(B)に示すように、120万回の延伸を繰り返した後において、白色の微細粒ペースト上において黒色が発色するので、亀裂が発生したことを容易に視認できる。

[0038] 本実施形態によれば、比較的初期の段階の疲労亀裂においても、目視検査で容易に確認することができ、各種機械や構造物等の安全性の向上に寄与することができる。また、微細粒ペーストがくさびを形成することにより、亀裂の進展が自動的に抑制され、各種機械や構造物等の疲労寿命が延びる。さらに、疲労亀裂の検出及び進展の抑制において、予め、疲労亀裂が発生すると予想される位置に微細粒ペーストを塗布しておくだけで良く、超音波探傷、浸透探傷、又は、磁粉探傷等の非破壊検査手法と比べて実施が遥かに容易且つ安価である。

産業上の利用可能性

[0039] 本発明は、金属等の表面に発生する疲労亀裂の進展を抑制する方法、及び、疲労亀裂を検出する方法において利用することが可能である。

図面の簡単な説明

[0040] [図1]本発明の一実施形態に係る疲労亀裂の進展抑制方法を説明するための図である。

[図2]疲労試験において微細粒ペーストを塗布する母材として用いる試験片の形状を示す図である。

[図3]疲労試験の結果において、公称応力レンジ $\Delta \sigma_n$ と破断寿命 N_f との関係を示す図である。

[図4]本発明の一実施形態に係る疲労亀裂の検出方法を説明するための図である。

[図5]図2に示す形状を有する高張力鋼における疲労亀裂の検出状態及び進展状況を示す図である。

[図6]疲労亀裂の検出方法の別の試験に用いる溶接継手試験片の形状を示す図である。

[図7]図6に示す溶接継手試験片の溶接部における亀裂の検出状態を示す図である

。

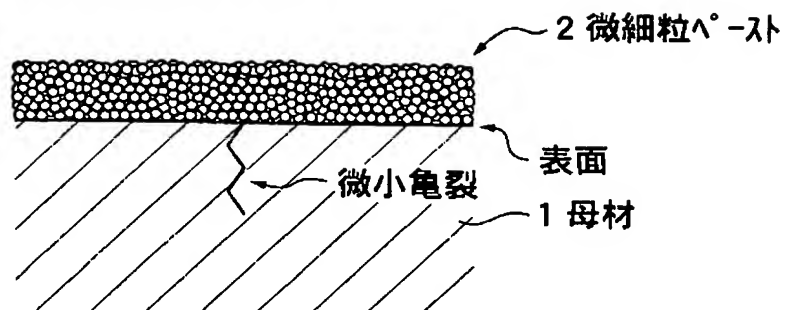
[図8]疲労亀裂の発生及び進展を説明するための図である。

請求の範囲

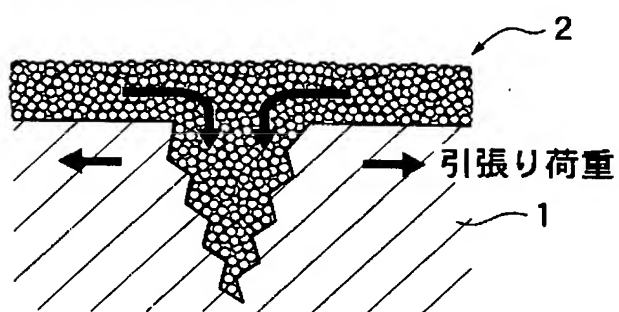
- [1] 母材の疲労亀裂の進展を抑制する方法であって、
母材の硬度以上の硬度を有する粒子と粘性を有する油とが混合されたペーストを準備するステップ(a)と、
前記母材の所望の個所に前記ペーストを塗布するステップ(b)と、
を具備する疲労亀裂の進展抑制方法。
- [2] 前記粒子の粒径が $2\mu\text{m}$ 〜 $40\mu\text{m}$ である、請求項1記載の疲労亀裂の進展抑制方法。
- [3] ステップ(a)が、
粘度が $5000\sim 15000\text{cP}$ (センチポワズ)の油を調整するステップ(a1)と、
ステップ(a1)において生成された油に前記粒子を混合するステップ(a2)と、
を含む、請求項1記載の疲労亀裂の進展抑制方法。
- [4] ステップ(a)が、
粘度が $5000\sim 15000\text{cP}$ (センチポワズ)の油を調整するステップ(a1)と、
ステップ(a1)において生成された油に前記粒子を混合するステップ(a2)と、
を含む、請求項2記載の疲労亀裂の進展抑制方法。
- [5] 母材の疲労亀裂を検出する方法であって、
母材の硬度以上の硬度を有する粒子と粘性を有する油とが混合されたペーストを準備するステップ(a)と、
前記母材の所望の個所に前記ペーストを塗布するステップ(b)と、
前記母材において疲労亀裂が開閉することによって前記粒子によって母材が研削されて生じた母材粉が、前記ペーストの表面に移動して生じた色彩の変化に基づいて、疲労亀裂を検出するステップ(c)と、
を具備する疲労亀裂の検出方法。
- [6] 前記粒子が、白色のセラミックスである、請求項5記載の疲労亀裂の検出方法。
- [7] ステップ(a)が、
粘度が $5000\sim 15000\text{cP}$ (センチポワズ)の油を調整するステップ(a1)と、
ステップ(a1)において生成された油に前記粒子を混合するステップ(a2)と、

- を含む、請求項5記載の疲労亀裂の検出方法。
- [8] ステップ(a)が、
 粘度が5000〜15000cP(センチポワズ)の油を調整するステップ(a1)と、
 ステップ(a1)において生成された油に前記粒子を混合するステップ(a2)と、
を含む、請求項6記載の疲労亀裂の検出方法。
- [9] 母材の疲労亀裂の進展を抑制し、又は、母材の疲労亀裂を検出するために、前記母材の所望の個所に塗布されるペーストであって、
 粒径が $2\mu\text{m}$ 〜 $40\mu\text{m}$ の粒子と、
 粘度が5000〜15000cP(センチポワズ)の油と、
 を混合して得られたペースト。
- [10] 前記粒子が、白色のセラミックスである、請求項9記載のペースト。

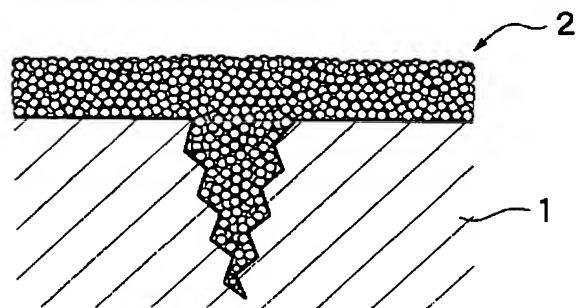
[図1]



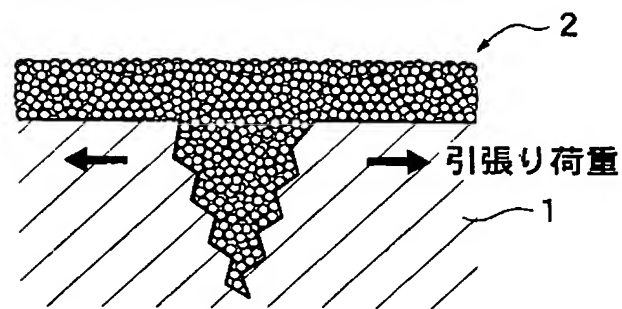
(A)



(B)

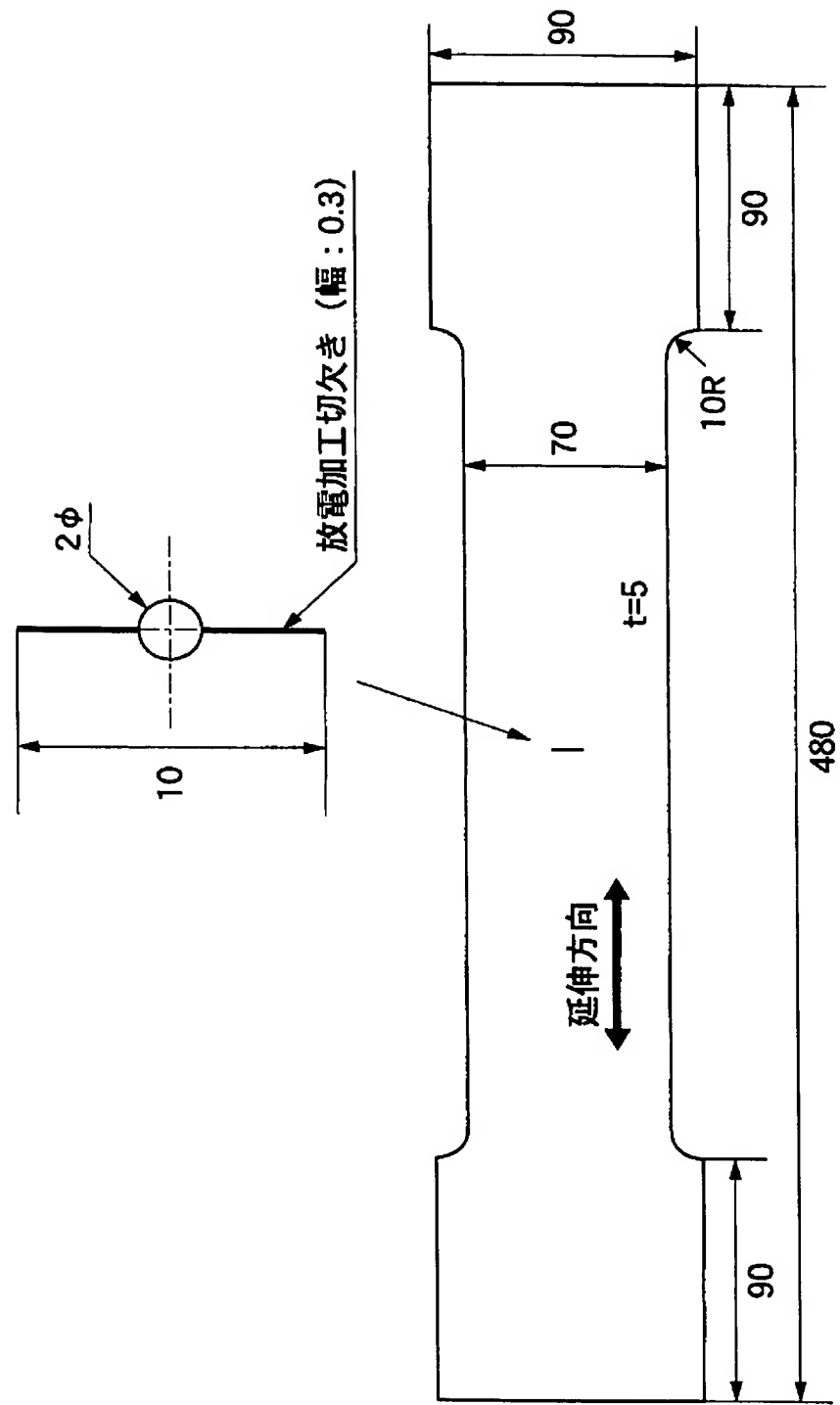


(C)

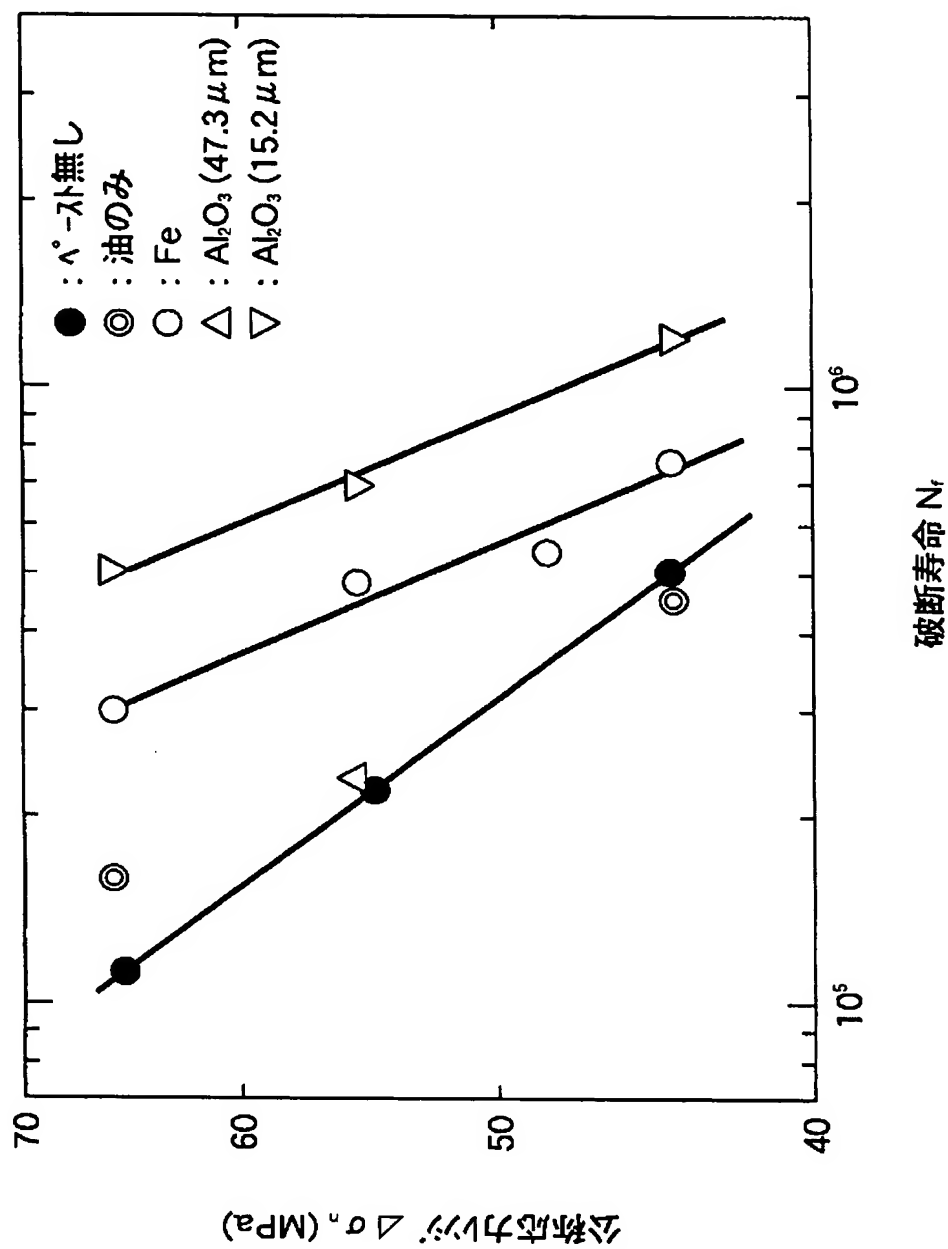


(D)

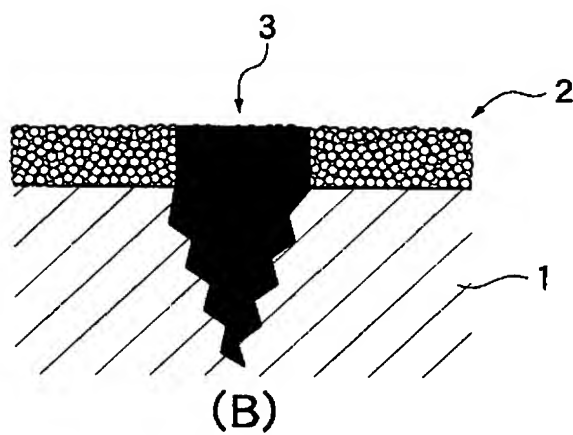
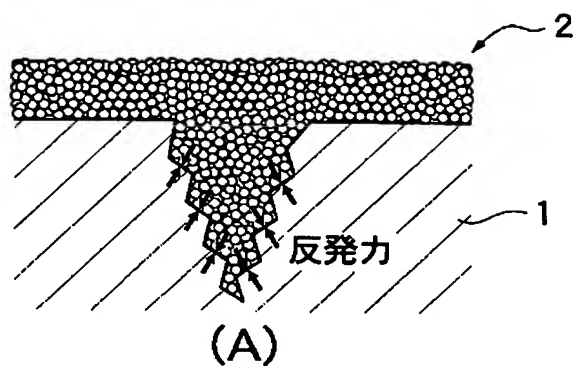
[図2]



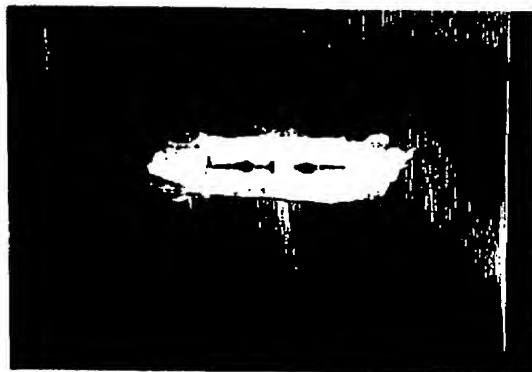
[図3]



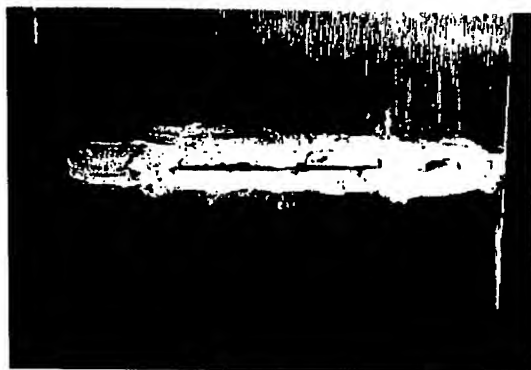
[図4]



[図5]



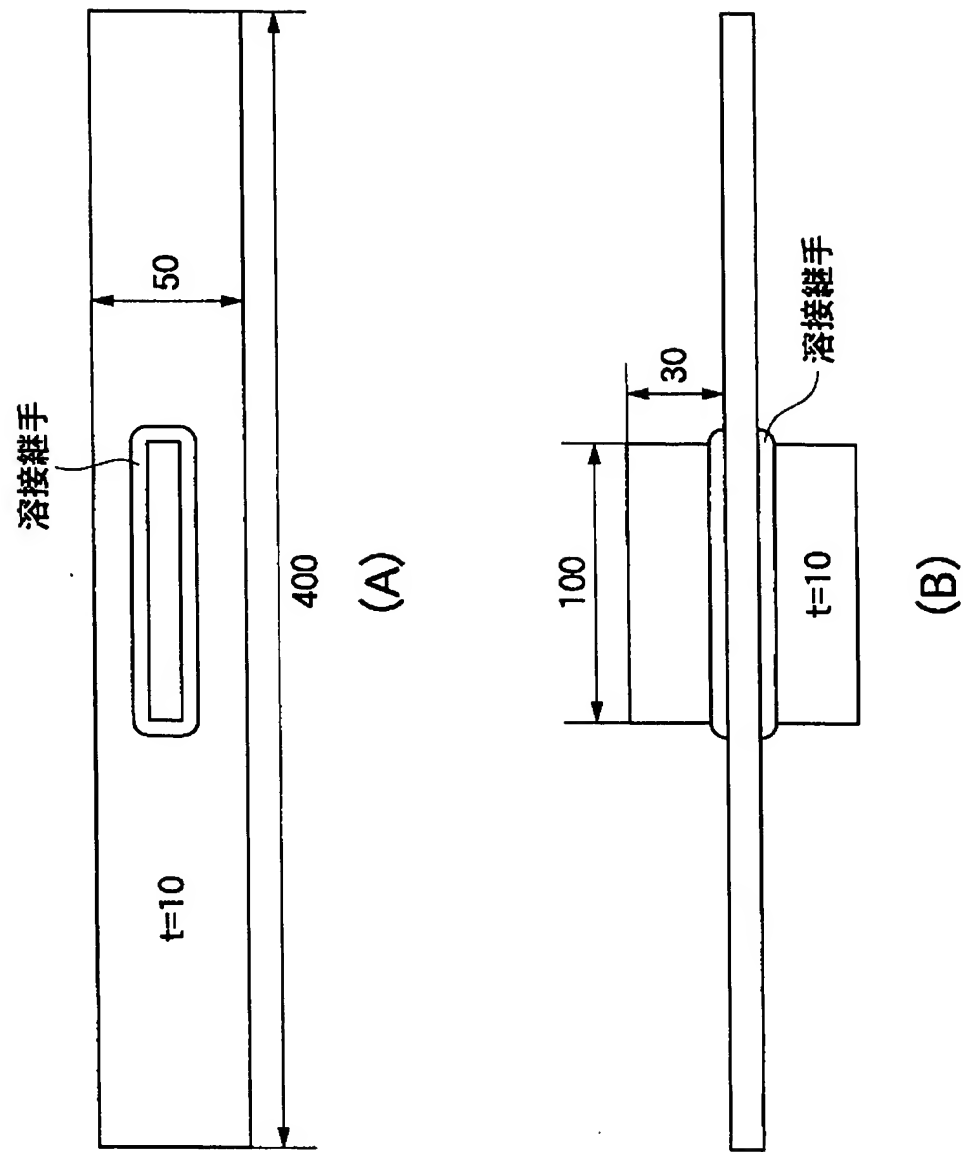
(A)



(B)

Best Available Copy

[図6]



[図7]



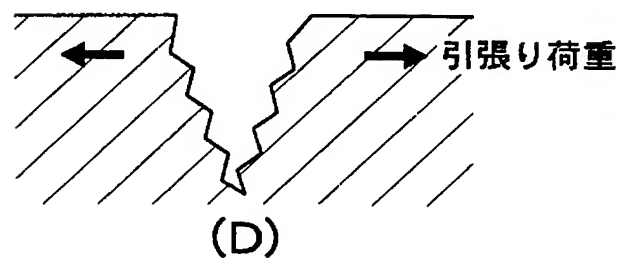
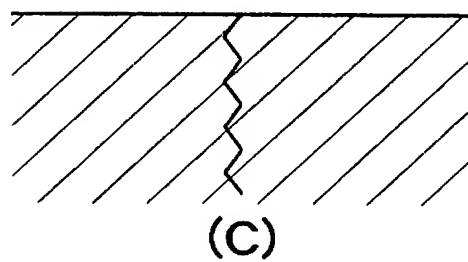
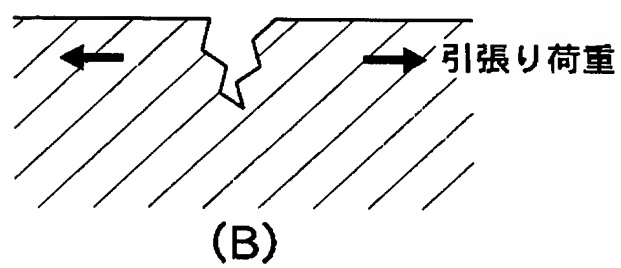
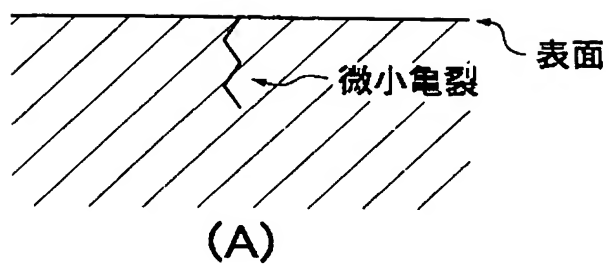
(A)



(B)

Best Available Copy

[図8]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/009312

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ B23P6/04, G01N21/88

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ B23P6/04, G01N21/88, 33/20

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2004
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2004 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2004

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 5-57532 A (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.), 09 March, 1993 (09.03.93), Full text; all drawings (Family: none)	1-10
A	JP 11-123617 A (Komatsu Ltd.), 11 May, 1999 (11.05.99), Full text; all drawings (Family: none)	1-10
A	JP 5-119032 A (Nissan Motor Co., Ltd.), 14 May, 1993 (14.05.93), Full text; all drawings (Family: none)	5-10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
21 September, 2004 (21.09.04)

Date of mailing of the international search report
12 October, 2004 (12.10.04)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ B23P 6/04, G01N 21/88

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ B23P 6/04
G01N 21/88, 33/20

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2004年
日本国登録実用新案公報	1994-2004年
日本国実用新案登録公報	1996-2004年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	JP 5-57532 A (三菱重工業株式会社) 1993. 03. 09, 全文全図 (ファミリーなし)	1-10
A	JP 11-123617 A (株式会社小松製作所) 1999. 05. 11, 全文全図 (ファミリーなし)	1-10
A	JP 5-119032 A (日産自動車株式会社) 1993. 05. 14, 全文全図 (ファミリーなし)	5-10

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

21. 09. 2004

国際調査報告の発送日

12.10.2004

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

田村 嘉章

3C

8608

電話番号 03-3581-1101 内線 3324